

АФАНАСЬЕВА ОЛЬГА ВАЛЕРЬЕВНА

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ  
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ НА УГЛЕ

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Казань – 2010

**Работа выполнена в Исследовательском центре проблем энергетики  
Учреждения Российской академии наук Казанского научного центра РАН**

**Научный руководитель:**

**кандидат технических наук  
Мингалева Гузель Рашидовна**

**Официальные оппоненты:**

**доктор технических наук,  
профессор  
Николаев Николай Алексеевич**

**кандидат технических наук,  
доцент  
Ртищева Алена Сергеевна**

**Ведущая организация:**

**ГУ «Центр энергосберегающих  
технологий Республики Татарстан  
при Кабинете Министров Республики  
Татарстан»**

**Защита диссертации состоится «17» декабря 2010 г. в 16<sup>00</sup> ч. на заседании диссертационного совета Д 212.080.06 при ГОУ ВПО «Казанский государственный технологический университет» в зале заседаний Ученого совета Казанского государственного технологического университета по адресу: г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний.**

**Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68.**

**С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Казанский государственный технологический университет» и на сайте [www.kstu.ru](http://www.kstu.ru).**

**Автореферат разослан «15» ноября 2010 г.**

**Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.080.06,  
д.т.н., профессор**



**НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ**



**0000681158**

**Поникаров С.И.**

**Актуальность работы.**

Современный уровень промышленного производства характеризуется непрерывным ростом потребления тепловой и электрической энергии. В настоящее время в качестве топлива преимущественно используются природный газ, мазут и уголь, которые обладают определенными достоинствами и недостатками. Так, природный газ является весьма перспективным видом топлива, который широко применяется в энергоустановках любой мощности. Однако, в силу современного геополитического состояния России, использование природного газа в качестве энергоносителя в ряде регионов России, таких как Дальний Восток, Сибирь, Север, является весьма проблематичным в связи с необходимостью прокладки газопроводов на огромные расстояния. Мазут широко применяется на отмеченных территориях путем доставки морским и речным транспортом, но при использовании требуется постоянное поддержание его в горячем состоянии, на что уходит значительная часть доставляемого топлива.

В связи с этим для России, особенно для северных и восточных территорий, наиболее перспективным и доступным топливом для энергоустановок является уголь, который может быть завезен в благоприятный для прохождения транспорта сезон и использоваться в течение нескольких отопительных периодов при незначительных затратах на его хранение.

Разработки в области малой энергетики (мощность энергетических объектов до 25 МВт), ориентированной на использование угля в качестве топлива, в России носят опытно-промышленный и экспериментальный характер, при этом полностью отсутствуют методические и нормативные материалы, позволяющие выбрать оптимальную комплектацию технологической схемы с учетом требуемой мощности и характеристик угля. В этой связи актуальной является разработка методики определения эффективности энергетических объектов, работающих на угле, на основе комплексного подхода.

Представленная диссертационная работа посвящена решению задачи анализа эффективности энергетических объектов, работающих на угле и предназначенных для автономного снабжения тепловой и электрической энергией промышленных предприятий и населенных пунктов.

**Цель работы.**

Разработка и обоснование комплексной методики определения эффективности автономных источников энергоснабжения, работающих на угле, обеспечивающих промышленные предприятия тепловой и электрической энергией, и алгоритма выбора оптимальной комплектации технологических схем в зависимости от мощности и типа угля.

**Основные задачи исследований** включают:

- выявление типовых схем и создание классификации автономных источников энергоснабжения, работающих на угле;
- разработку комплексной методики оценки их эффективности на основании определения энергетических, экологических, технико-экономических и термозко-номических показателей;
- оптимизацию удельных затрат энергии и технико-экономических показателей автономных энергетических объектов;

- моделирование технологических схем автономных источников энергоснабжения, работающих на угле;
- создание и реализацию алгоритма расчета и выбора оптимальной технологической схемы.

#### **Научная новизна** выполненных исследований:

- создана классификация энергетических объектов, работающих на угле и предназначенных для автономного энергоснабжения;
- разработана комплексная методика определения эффективности технологических схем автономных источников энергоснабжения, усовершенствована система оценки технико-экономических показателей с учетом специфики объекта исследования;
- предложена математическая модель технологической схемы энергетического объекта, использующего в качестве топлива уголь;
- разработан алгоритм выбора оптимальной комплектации и определения эффективности автономного источника энергоснабжения.

#### **Практическое значение результатов работ:**

- создана комплексная методика расчета и оценки эффективности автономных источников энергоснабжения.
- разработаны рекомендации по выбору комплектации технологической схемы и определения ее эффективности.

#### **Основные положения диссертации**, выносимые на защиту:

- 1) классификация автономных источников энергоснабжения в зависимости от вида применяемого основного оборудования и возможности производства побочных продуктов;
- 2) комплексная методика определения эффективности энергетических объектов на основании проведения энергетического, технико-экономического, термоэкономического анализа и вычисления экологических показателей;
- 3) математическая модель технологической схемы энергетических объектов, позволяющая оптимизировать затраты на подготовку угля к сжиганию;
- 4) алгоритм выбора оптимального варианта и расчета эффективности автономных источников энергоснабжения;
- 5) результаты оценки эффективности энергетических объектов различной мощности и рекомендации по выбору их комплектации в зависимости от необходимой мощности и качественных характеристик используемого угля.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается использованием при математическом моделировании и формировании комплексной методики классических подходов, основанных на фундаментальных законах технической термодинамики.

#### **Реализация работы.**

Результаты работы использованы при реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы (государственные контракты №П763, № 02.740.11.0062), ФЦП «Исследования и разработка по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» (гос. контракт № 02.516.11.6040), а также гранта РФФИ (№ 08-08-00233).

Разработанная методика может быть использована при курсовом и дипломном проектировании и чтении лекционных курсов «Промышленная теплоэнергетика». Разработанная программа для ЭВМ (Свидетельство о государственной регистрации №2010616246) использована при проведении фундаментальных исследований в области





следований в Учреждении Российской академии наук Казанском научном центре РАН по гос. контрактам №П763, № 02.740.11.0685.

### **Апробация работы.**

Основные положения работы были представлены, доложены и обсуждены: на Российской конференции (с международным участием) «Глубокая переработка твердого ископаемого топлива – стратегия России в 21 веке», Звенигород, 21-23 ноября 2007 г.; VIII, IX, X Международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение», Казань, декабрь 2007-2009 г.; 20-ой и 21-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», Казань, май 2008-2009 г.; III Всероссийской школе молодых ученых «Математические методы в экологии», Петрозаводск, 24–29 августа 2008 г.; VI, VII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН В.Е. Алемасова, Казань, 2008, 2010 г.; Четвертой международной школе-семинаре молодых ученых и специалистов «Энергосбережение-теория и практика», Москва, 20-24 октября, 2008 г.; Международной конференции «Ресурсная экономика, изменение климата и рациональное природопользование», Красноярск, 1-7 июля, 2009 г.; Ежегодных итоговых научных конференциях Казанского научного центра Российской академии наук, Казань, 2007-2010 г.; Ежегодных научных аспирантских семинарах Исследовательского центра проблем энергетики КазНЦ РАН, Казань, 2006-2010 г.

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 22 печатные работы, в том числе 9 статей, из них 4 опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, зарегистрирована программа для ЭВМ, представлено 12 докладов на международных и всероссийских научных конференциях.

### **Объем и структура работы.**

Диссертация изложена на 205 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Работа содержит 29 рисунков и 24 таблицы, библиографический список литературы из 124 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, дана ее общая структура, изложены цели и задачи исследований, определены основные научные положения диссертации, ее научная и практическая значимость.

**В первой главе** проведен обзор литературы по существующим схемам автономных энергетических объектов, работающих на угле, и применимому к ним современному энергетическому оборудованию отечественного и зарубежного производства. Обоснован выбор твердого топлива для автономных источников энергоснабжения промышленных предприятий, проведен анализ существующих технологий переработки твердого топлива (газификация, пиролиз) с целью получения генераторного газа, используемого впоследствии при производстве тепловой и электрической энергии. Рассмотрены варианты энергоснабжения промышленных предприятий на базе автономных источников энергии (основное, дополнительное и резервное). Создана классификация энергетических объектов, работающих на угле (рис. 1).

Во второй главе проведен анализ структурной организации существующих автономных энергетических объектов, работающих на угле, и предназначенных для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, определены их тепловая, термодинамическая эффективность и основные экологические показатели. Для анализа структуры использован один из приемов системного анализа - структурное (или топологическое) представление объекта исследования.



Рис. 1. Классификация автономных источников энергоснабжения, работающих на угле: ГТУ - газотурбинная установка, ПТ - паровая турбина, ДГ-дизель-генератор, КУ- котел-утилизатор, УТ- утилизационный теплообменник

На основании анализа технологической схемы энергетического объекта, работающего на угле, составлена информационная блок-схема, в виде ориентированного графа. Установлены внешние и внутренние связи между потоками, а также определена последовательность проведения теплового расчета.

В качестве объекта исследования выбраны схемы автономных источников энергоснабжения, работающих на угле, описанные в литературе и имеющие опытно-промышленное назначение. Выбор данных схем обоснован различными потребностями промышленных предприятий (максимальная выработка электрической энергии, возможность аккумулирования энергии либо наличие производства побочных продуктов). На основании структурного анализа и разработанной в 1 главе классификации, схемы разбиты на соответствующие блоки с учетом протекающих в них процессов (рис. 2). Деление на блоки необходимо для их последующей унификации с целью повышения эффективности каждого блока.

Оценка энергетической эффективности проведена на основании теплового и термодинамического анализа. Составлены материальные, тепловые и эксергетические балансы как для отдельных блоков, так и систем в целом. Такой подход позволяет рассматривать схемы комплексно, находить резервы повышения эффективности, а также сравнивать между собой различные типы. В ходе теплового ана-

лиза установлены балансовые зависимости для каждого аппарата и для схемы в целом, а также определены расхода теплоносителей для каждого процесса.

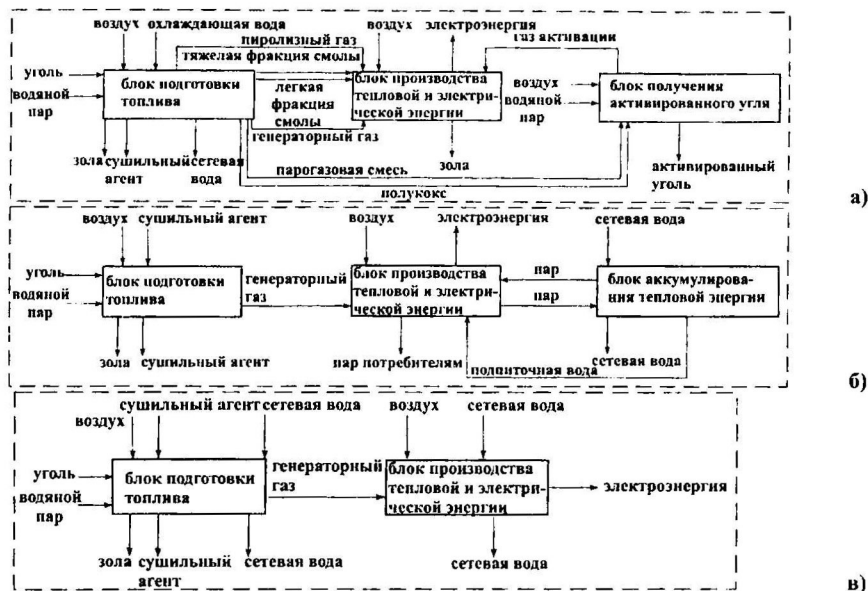


Рис. 2. Схемы автономных источников энергоснабжения, работающих на угле: а - с ГТУ, КУ, ПТ с пиролизом и газификацией полужококса и производством активированного угля, б - с ГТУ, КУ, ПТ и с аккумулятором тепловой энергии, в - с ДГ без производства побочных продуктов

Оценка термодинамической эффективности проведена посредством эксергетического анализа. Эффективность работы каждого аппарата (элемента схемы), так и объекта в целом, в работе оценена путем отношения полезной эксергии к затраченной, определены потери эксергии. Для схемы с пиролизом угля и газификацией полужококса эксергетический КПД  $\eta_{ex}$  предложено определять по следующей формуле (все составляющие выражены в кДж/кг сырого угля):

$$\eta_{ex} = \frac{L_{ГТУ} + L_{ПТ} + \sum E_{AU}}{E_y + \sum E_v + \sum E_{пар} + \sum L + E_{мех} + E'_{ca}}, \quad (1)$$

где  $L_{ГТУ}$ ,  $L_{ПТ}$  - электрическая мощность газовой и паровой турбины;  $E'_{ca}$  - эксергия сушильного агента, поступающего в мельницу;  $\sum E_{AU}$  - суммарная эксергия активированного угля;  $E_y$  - эксергия сырого угля;  $\sum E_v$  - суммарная эксергия воздуха;  $\sum E_{пар}$  - суммарная эксергия водяного пара;  $\sum L$  - суммарная электрическая мощность аппаратов;  $E_{мех}$  - эксергия теплового потока, выделяющегося при работе мельющих органов мельницы.

Эксергетический КПД для схемы с аккумуляцией тепловой энергии  $\eta_{ex}$  вычисляется по следующей предложенной формуле:

$$\eta_{ex2} = \frac{L_{тгу} + L_{пгг} + E_{пт} + E_{св}'' + E_{пп} + E_{вк}}{E_y + \sum E_s + E_{пар} + \sum L + E_{мск} + E_{св}' + E_{са}' + E_{вк}'}, \quad (2)$$

где  $E_{св}''$  - эксергия сетевой воды, идущей потребителям;  $E_{св}'$  - эксергия сетевой воды, поступающей в аккумулятор;  $E_{пт}$  - эксергия пара, возвращающегося в турбину;  $E_{пп}$  - эксергия пара, поступающего потребителям;  $E_{вк}'$  - эксергия подпиточной воды для котлоагрегата;  $E_{вк}$  - эксергия тепла, накопленного в аккумуляторе; остальные обозначения как в формуле (1).

Для схемы с дизель-генератором  $\eta_{ex3}$  предлагается оценивать по формуле:

$$\eta_{ex3} = \frac{L_{дг} + \sum E_{св}''}{E_y + \sum E_s + E_{пар} + \sum L + E_{мск} + \sum E_{св}' + E_{са}'}, \quad (3)$$

где  $L_{дг}$  - электрическая мощность дизель-генератора;  $\sum E_{св}''$  - суммарная эксергия сетевой воды на входе;  $\sum E_{св}'$  - суммарная эксергия сетевой воды на выходе; остальные обозначения как в формулах (1) и (2).

При расчете определены потоки эксергии подводимых теплоносителей (пар, воздух), физическая и химическая эксергия угля по известным зависимостям. Для наглядного представления преобразования потоков, происходящих в системе, построены эксергетические диаграммы (рис. 3).

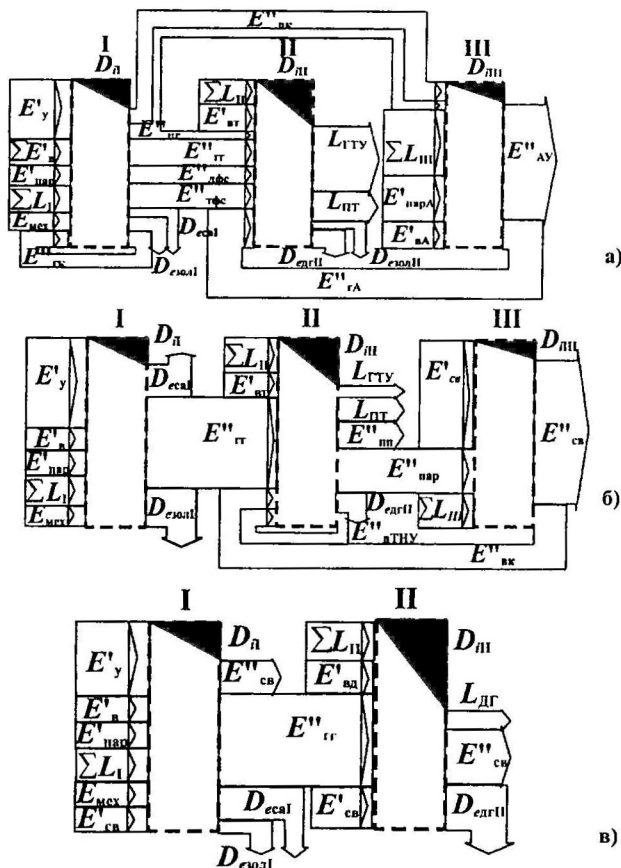
Влияние автономных источников энергоснабжения, работающих на угле, на окружающую среду характеризуется выбросами загрязняющих веществ, образующихся при сжигании топлива. В настоящее время не разработано методик для расчета выбросов, поступающих от данных объектов. В этой связи расчет выполнен по действующим методикам с учетом ступенчатого сжигания угля.

Проведен анализ влияния выбросов, поступающих от автономных источников энергоснабжения, на атмосферу с учетом регионального (температура окружающей среды) и масштабного (мощность автономного источника) факторов. Согласно расчетам, удельная эксергия продуктов сгорания возрастает с увеличением мощности. Что касается регионального фактора, то меньший экологический вред наносится при строительстве автономных источников в регионах с более низкой температурой отопительного периода, что обусловлено меньшей эксергией продуктов сгорания.

**В третьей главе** представлена разработанная система технико-экономических показателей, отражающих специфику автономных энергетических объектов, работающих на угле, а также результаты оптимизации удельных затрат эксергии и технико-экономических показателей.

Основными технико-экономическими показателями в работе выступают: капиталовложения в строительство, основное и вспомогательное оборудование, эксплуатационные затраты, себестоимость вырабатываемой энергии с учетом инвестиционной составляющей, срок окупаемости, удельные затраты эксергии и удельные денежные затраты. Определение капиталовложений и эксплуатационных затрат проведено с использованием нормативных документов и существующих методик расчета. Срок окупаемости рассчитан как отношение капитальных затрат на разницу в стоимости энергии, производимой на автономном энергетическом объекте, и отпускаемой от централизованной энергосистемы.

Рис. 3. Диаграммы Сэнки для энергетических объектов, работающих на угле: а – с пиролизом и газификацией полуккокса, б – с аккумулятором тепловой энергии, в – с ДГ; обозначения:  $E''_{пк}$ ,  $E''_{пк}$ ,  $E''_{пк}$ ,  $E''_{пк}$ ,  $E''_{пк}$  – эксергия пиролизного газа, полуккокса, газов, отходящих из калорифера, активированного угля и газов активации;  $E''_{пк}$ ,  $E''_{пк}$ ,  $E''_{пк}$  – эксергия генераторного газа, легкой и тяжелой фракции смолы;  $E''_{пк}$ ,  $E''_{пк}$  – эксергия воздуха, поступающего в ГТУ и ДГ;  $D_{сжол}$ ,  $D_{елг}$ ,  $D_i$  – внешние потери эксергии, уходящие с сушильным агентом, золой и дымовыми газами, внутренние потери эксергии;  $E''_{пк}$ ,  $E''_{пк}$  – эксергия воздуха и пара в активатор;  $E''_{пк}$ ,  $E''_{пк}$  – эксергия пара, выработанного в турбине, и пара, поступающего из теплонасосной установки; остальные обозначения как в формулах (1)–(3)



Цена на электроэнергию, вырабатываемую автономными источниками энергии, складывается из суммы инвестиционной составляющей и издержек производства и вычисляется по известной формуле:

$$P_s = \frac{k}{h} \frac{\sigma(1 + \sigma)^{T_R}}{(1 + \sigma)^{T_R} - 1} + i, \quad (4)$$

где  $k$  – удельные капиталовложения, руб./кВт;  $h$  – годовое число часов установленной мощности, ч/год;  $i$  – эксплуатационные издержки, руб./кВт;  $\sigma$  – годовой процент, %;  $T_R$  – срок возврата инвестиций, лет. При расчетах принято, что инвестиции должны окупиться с годовым процентом за счет продажи электроэнергии, производимой данным объектом.

При проведении оптимизации использованы зависимости, предложенные в методике Е.И. Янговского, однако для автономных источников энергоснабжения они имеют свою специфику и учитывают технологические особенности процесса. В качестве критериев оптимизации выбраны удельные затраты эксергии и денежные затраты. Удельные затраты эксергии определены согласно полученному выражению:

$$z_{ex} = \frac{1}{\eta_{ex}} + \frac{1}{K_{\varepsilon}} = \frac{1}{\eta_{ex}} + \frac{E_{стр}}{\tau \cdot N}, \quad (5)$$

где  $E_{стр}$  - полная величина эксергии, затраченная на строительство и оборудование;  $\tau$  - срок эксплуатации;  $N$  - мощность объекта;  $\eta_{ex}$  - эксергетический КПД;  $K_{\varepsilon}$  - коэффициент «эксергии-нетто» ( $K_{\varepsilon}$  принимается 2,5).

Удельные технико-экономические затраты предлагается оценивать по следующей зависимости:

$$z_{tex} = \frac{C - \Pi_{п.п} + \frac{1}{\tau} K}{C_{центр} + \frac{1}{\tau} K_{центр}}, \quad (6)$$

где  $C$  - эксплуатационные расходы;  $\Pi_{п.п}$  - стоимость побочных продуктов, производимых на энергетическом объекте, работающем на угле;  $K$  - капиталовложения;  $C_{центр}$  - эксплуатационные расходы, включающие в себя стоимость энергии при использовании природного газа в качестве топлива;  $K_{центр}$  - капиталовложения, включающие в себя стоимость подключения к централизованным сетям.

Проведена оптимизация эксергетических и технико-экономических показателей посредством построения  $S$ -кривой в двумерной системе координат, где на оси  $y$  отложены удельные затраты эксергии, а на оси  $x$  - приведенные технико-экономические затраты (рис. 4).

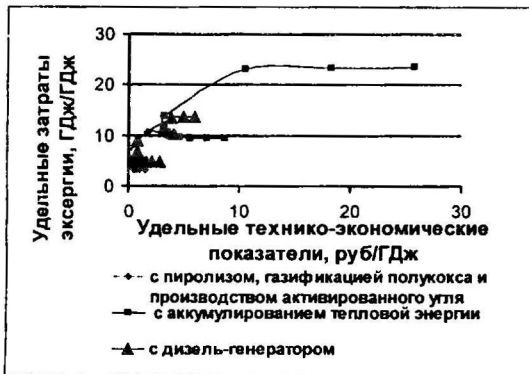


Рис. 4. Сопоставление затрат эксергии и денежных затрат на  $S$ -кривых для автономных источников энергоснабжения

В качестве варьируемого показателя – параметра оптимизации, выбрана цена топлива, так как от данного показателя, главным образом, и зависит целесообразность строительства автономных источников энергоснабжения, которая определяется, в первую очередь, соотношением

цены «газ-уголь». Минимальные значения получены для схемы с пиролизом и газификацией за счет производства и реализации активированного угля в качестве побочного продукта. Так, оптимальное соотношение удельных затрат эксергии и технико-экономических показателей достигается при эксергетической эффективности схемы 35% и стоимости угля 2040 руб./тонну. Оптимум на кривых выпадает на 5 год эксплуатации объекта. Соотношение цен «газ/уголь» в этот год достигнет 3:1, поэтому строить и эксплуатировать автономные источники энергоснабжения, работающие на угле, в России будет экономически эффективно.

**В четвертой главе** приведена методика оценки эффективности автономных источников энергоснабжения, включающая математическую модель технологических

схем, и результаты математического моделирования. Представленная методика позволяет оценить работу объекта комплексно и учитывает наиболее значимые стороны функционирования энергетического объекта, такие как энергетическая эффективность, технико-экономические, термозкономические критерии и экологические показатели. Математическая модель представлена уравнениями материального, теплового и эксергетических балансов для отдельных аппаратов и всей схемы с ограничениями по расходу, температуре сушильного агента, расходу окислителя и продуктов сгорания, поступающих из основного генерируемого оборудования с учетом производства побочных продуктов:

$$\sum_{i=1}^N g'_i = \sum_{j=1}^K g''_j; \quad \sum_{i=1}^N q'_i = \sum_{j=1}^K q''_j + q_{\text{пот}}; \quad \sum_{i=1}^N E'_i = \sum_{j=1}^K E''_j + D_e + D_i, \quad (7)$$

где  $g'_i, q'_i, E'_i$  - материальные, тепловые и эксергетические потоки на входе;  $g''_j, q''_j, E''_j$  - тоже на выходе;  $q_{\text{пот}}$  - тепловые потери;  $D_e, D_i$  - внешние и внутренние потери эксергии.

На основании полученных уравнений составлена матрица смежности информационного графа системы уравнений математической модели, где строки соответствуют уравнениям, а столбцы - переменным, входящим в них. Полученная матрица позволяет проследить, какие параметры являются взаимозависимыми в уравнениях, и как варьирование одного из них скажется на изменении других переменных и теплового КПД  $\eta_T$  отдельных аппаратов и всей схемы.

В рамках диссертационной работы создана программа для ЭВМ, которая позволяет в зависимости от характеристик используемого угля и заданной потребителем электрической мощности, рассчитать основное энергетическое оборудование, оборудование для подготовки топлива и определить эффективность объекта. Общая концепция разработки технологической схемы автономного энергетического объекта малой мощности и определения его эффективности в виде алгоритма представлена на рис. 5. Выбор оптимальной схемы для конкретного потребителя осуществляется посредством определения термозкономической эффективности  $\varphi$ , которая должна стремиться к своему максимальному значению:

$$\varphi = \eta_{\text{ex}} / \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^n (\kappa + C) + Z_d}{B \cdot C_y} \right) \Rightarrow \max, \quad (8)$$

где  $\kappa$  - удельные капитальные затраты, руб./год;  $Z_d$  - затраты на доставку топлива, руб./год;  $B$  - годовой расход угля на объекте, т/год;  $C_y$  - стоимость угля, руб./т.

На основании разработанной программы для ЭВМ произведен расчет технологических схем различной комплектации при использовании в качестве топлива каменного угля марки Д Кузнецкого бассейна (таблица 1). Полученные результаты могут быть использованы при выборе оптимальной комплектации автономного источника энергоснабжения промышленного предприятия необходимой мощности при использовании конкретного типа угля. На основании выполненных исследований разработаны рекомендации, включающие в себя: различные комплектации технологических схем с маркировкой оборудования, входящего в их состав в зависимости от типа схемы и требуемой мощности; диапазон применения конкретного типа схемы в зависимости от ее мощности (рис. 6).



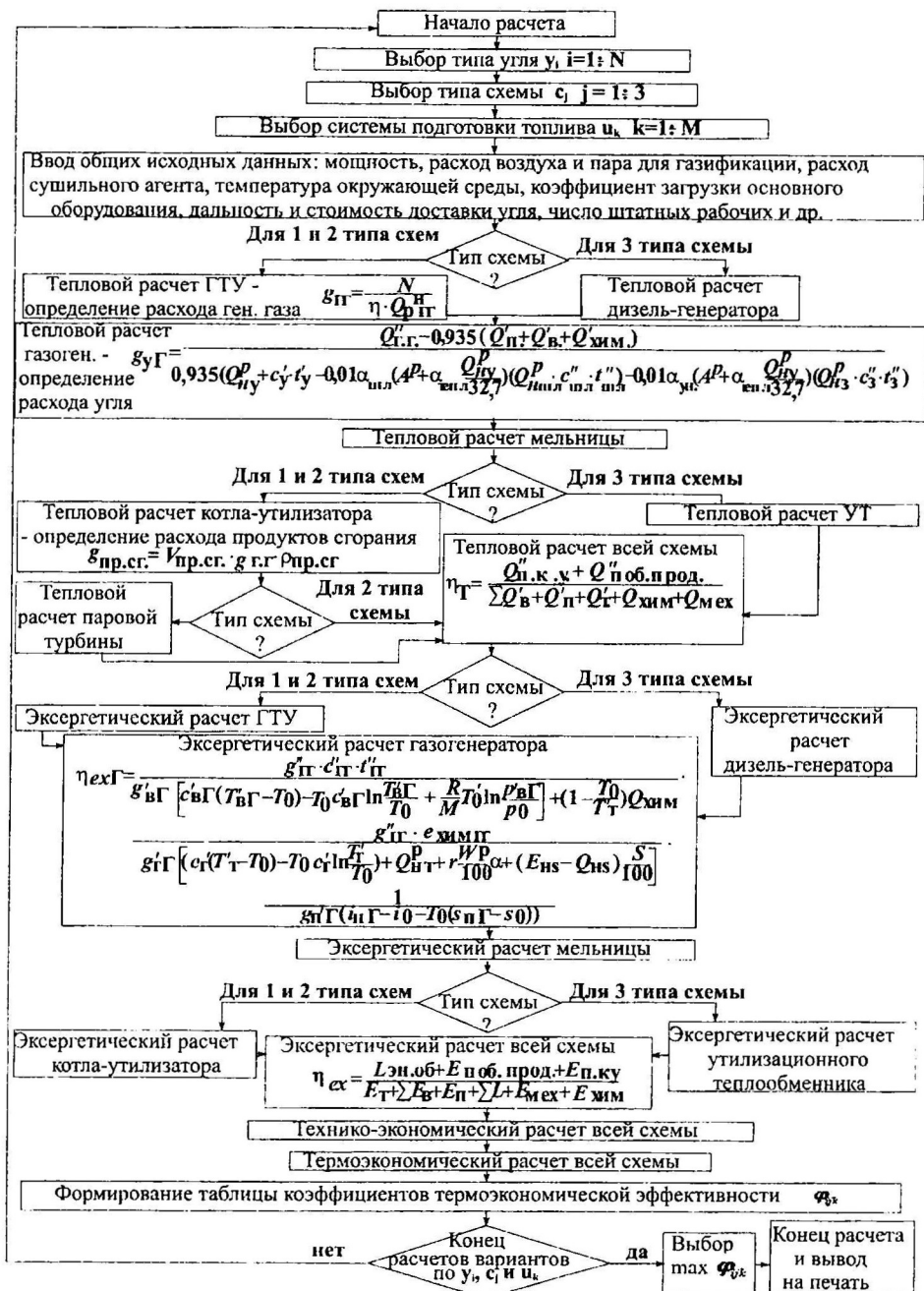
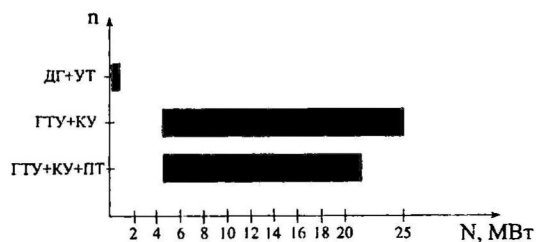


Рис. 5. Алгоритм расчета и выбора оптимального варианта энергетического объекта малой мощности, работающего на угле



**Таблица 1. Результаты расчетов для автономных источников энергоснабжения**

Мощность, МВт	$\eta_t$ , %	$\eta_{ex}$ , %	$\varphi$ , %	Себестоим. эл. энергии $C_{эл}$ , руб/кВт·ч	Себестоимость тепл. энергии $C_{тепл}$ , руб/Г·кал
<b>1 тип схемы (ГТУ+КУ+ПТ)</b>					
4,6	27	20	6,9	0,50	825,56
8,5	24	21	7,3	0,61	1093,02
11,5	36	25	8,5	0,36	360,47
13,5	36	24	8,4	0,35	348,84
18,5	23	21	8,9	0,36	709,30
22	35	14	9,1	0,36	965,12
<b>2 тип схемы (ГТУ+КУ)</b>					
4,1	24	8	2	0,58	1453,49
6	29	11	3,4	0,59	1046,51
8,6	35	16	6,8	0,39	465,12
10	42	18	7	0,32	430,23
12	42	17,7	6,8	0,29	430,40
16	33	12	4,8	0,28	465,12
18	42	14,6	6,4	0,28	465,12
20	18,7	6	2,8	0,24	1000,00
25	42	13	5,7	0,24	500,00
<b>3 тип схемы (ДГ+УТ)</b>					
0,2	11	10,3	2,6	4,70	3720,00
0,35	12	9	3,2	2,70	3720,00
0,4	17	12	3,3	2,29	3593,02



**Рис. 6. Диаграмма области использования технологических схем автономных источников энергоснабжения различной мощности: n- тип схемы, N- мощность объекта**

**Заключение** содержит выводы по результатам выполненной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Создана классификация автономных источников энергоснабжения промышленных предприятий, работающих на угле, в зависимости от применяемого энергетического оборудования и наличия производства побочной продукции.
2. Проведена оптимизация удельных затрат эксергии и технико-экономических показателей для автономных источников энергоснабжения.
3. Разработана и обоснована комплексная методика по оценке эффективности технологических схем энергетических объектов, включающая определение эксер-

гетической эффективности, технико-экономических показателей, а также оценку экологических показателей при сжигании угля.

4. Предложена математическая модель автономных источников энергоснабжения.

5. Разработан и реализован алгоритм выбора оптимальной комплектации энергетических объектов на основании обеспечения наибольшей термозкономической эффективности.

6. Определена тепловая, термодинамическая и термозкономическая эффективность автономных источников энергоснабжения различной мощности ( $N=0,2-25$  МВт) в зависимости от комплектации и качественных характеристик угля.

7. Представлены рекомендации по выбору технологической схемы автономных энергетических объектов, работающих на угле, в зависимости от мощности и запросов потребителей.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

##### *Издания, входящие в перечень ВАК:*

1. Афанасьева О.В., Мингалсева Г.Р. Экологические показатели угольных мини-ТЭС и анализ их эффективности // Альтернативная энергетика и экология. – 2008. – №8. – С. 47-51.

2. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Эксергетическая эффективность угольных мини-ТЭС как критерий перспективности их широкого использования // Химия твердого топлива. – 2009. – №1. – С. 64-69.

O. V. Afanas'eva, G. R. Mingaleeva Exergy efficiency of small coal-fired power plants as a criterion of their wide applicability // Solid Fuel Chemistry. - Vol. 43. No. 1. - 2009. P. 55–59.

3. Афанасьева О.В., Шамсутдинов Э.В., Мингалеева Г.Р. Использование CO<sub>2</sub> в угледобывающих отраслях промышленности // Экология и промышленность России. 2009. – №7. – С. 2-5.

4. Афанасьева О.В., Вандышева С.С., Мингалеева Г.Р. Оценка эффективности мини-ТЭС, работающих на твердом топливе // Альтернативная энергетика и экология. – №6. 2010. – С. 122-126.

##### *Программы для ЭВМ*

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010616246. Расчет технологической схемы мини-ТЭС, работающей на твердом топливе / Халитова Г.Р., Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. 21.09.2010.

##### *Другие периодические издания*

6. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Оценка тепловой эффективности системы подготовки топлива мини-ТЭС с пиролизом угля // Труды Академэнерго.– 2006.– № 4.– С. 70-79.

7. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Термодинамическая эффективность угольной мини-ТЭС с пиролизом и газификацией // Труды Академэнерго.–2007.– № 3.– С. 52-61.

8. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Техничко-экономические показатели угольных мини-ТЭС // Труды Академэнерго. 2009. – №2. – С. 54-63.

9. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Оптимизация удельных эксергетических и технико-экономических показателей угольных мини-ТЭС // Труды Академэнерго. – 2009. – №4. – С. 52-60.

10. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Тепловая эффективность производства вторичных продуктов на угольной мини-ТЭС // *Фундаментальные исследования.* – 2007. – № 6. – С. 60-61.

*Материалы научных конференций и симпозиумов*

11. Афанасьева О.В. Определение эксергетических показателей угольной мини-ТЭС с аккумулярованием тепловой энергии / *Материалы докладов XIX Международной Интернет - конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (Микмус-2007), г. Москва, 5-7 декабря 2007 г.* – С.101.

12. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Обеспечение надежности энергоснабжения на базе угольных мини-ТЭС / *Труды VIII Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение». Часть 2.* – г. Казань, 4-6 декабря 2007 г. – С. 14-19.

13. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Оценка эффективности работы электростанции малой мощности с дизель-генератором для обеспечения резервного и автономного энергоснабжения / *Сборник материалов XX Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», г. Казань, 13-15 мая 2008 г.* – С. 125-127.

14. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Эксергетический анализ технологической схемы современной дизельной газогенераторной мини-ТЭС / *Сборник докладов XIV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 24-28 марта, 2008 г.* – С. 329-332.

15. Афанасьева О.В. Сравнительный анализ термодинамической эффективности мини-ТЭС различных типов / *Материалы докладов VI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН В.Е. Алемасова, г. Казань, 16-18 сентября, 2008 г.* – С. 362-365.

16. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Комплексный анализ эффективности использования угольных мини-ТЭС для энергообеспечения промышленных предприятий / *Труды IX Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» г. Казань, 2-4 декабря, 2008 г.* – С. 33-40.

17. Афанасьева О.В. Анализ потерь эксергии в теплотехнологических схемах угольных мини-ТЭС / *Труды четвертой международной школы-семинара молодых ученых и специалистов «Энергосбережение-теория и практика», г. Москва, 20-24 октября, 2008 г.* – С. 51-57.

18. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Использование угольных малых электростанций для автономного энергоснабжения / *Сборник материалов XXI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», г. Казань, 12-14 мая, 2009 г.* – С. 115-117.

19. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Экономические аспекты внедрения угольных мини-ТЭС для обеспечения устойчивого развития промышленных предприятий / *Сборник материалов международной конференции Ресурсная экономика, изменение климата и рациональное природопользование - 2009: 1-7 июля 2009 г.* – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2009. – С. 462-473.

20. Афанасьева О.В., Шамсутдинов Э.В., Мингалеева Г.Р. Экономическая эффективность использования  $\text{CO}_2$  на угольных месторождениях для извлечения метана / Сборник материалов международной конференции Ресурсная экономика, изменение климата и рациональное природопользование - 2009: 1-7 июля 2009 г. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2009. – С. 474-483.
21. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Определение инвестиционной составляющей в себестоимости энергии угольных мини-ТЭС // Труды X Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение», г. Казань, 1-3 декабря, 2009 г. – С. 321-328.
22. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Моделирование технологической схемы мини-ТЭС с газификацией твердого топлива // Материалы докладов VII школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова, г. Казань, 15-17 сентября, 2010 г. – С. 430-433.

Соискатель \_\_\_\_\_




Афанасьева О.В.





Подписано в печать 10.11.2010. Формат 60х84 1/16.  
Тираж 100 экз. Гарнитура «Таймс». Бумага ксероксная.  
Усл. печ. л. 1,0. Заказ № 11/99. Печать ризографическая.



Отпечатано с готового оригинал-макета  
в издательстве «ИГМА-пресс»  
ИП Маликовой И.Г. ОГРН 308169031500136  
Казань, ул. Московская, д.31, офис 215. Тел. 526-03-69.

10-